

# Uszkodzenia kawitacyjne w silnikach spalinowych

Piotr Ignaciuk, Leszek Gil

*W artykule zaprezentowano silnik spalinowy jako maszynę zawierającą podzespoły hydrauliczne, w których pojawia się zjawisko kawitacji. Kawitacja występując w tych układach jest przyczyną ich uszkodzeń. Przedstawiono też wpływ erozji kawitacyjnej na rozwój uszkodzeń tribologicznych.*

**Słowa kluczowe:** silnik spalinowy, układ hydrauliczny, kawitacja, erozja kawitacyjna.

## Wstęp

Silnik spalinowy to maszyna, w której występują układy hydrauliczne: układ smarowania, układ chłodzenia oraz układ zasilania paliwem. W układach tych występują przepływy cieczy którym może towarzyszyć kawitacja. Jest ona bezpośrednio związana dynamiką przepływu cieczy hydraulicznych: oleju smarowego, płynu chłodniczego oraz paliwa. W silniku spalinowym zjawisko kawitacji może być rozpatrywane w dwóch aspektach: pozytywnym i negatywnym. Zjawisko jest korzystne tylko w wysokociśnieniowych układach zasilania w sytuacji gdy następuje wtrysk strugi paliwa do komory spalania- wspomaga ono proces rozpadu i odparowania paliwa [3]. Wszelkie inne aspekty występowania kawitacji w silniku mają charakter niekorzystny i związane są z erozją kawitacyjną elementów silnika.

## 1. Kawitacja w silnikach

Podstawowym warunkiem pojawienia się kawitacji jest naruszenie ciągłości przepływającej cieczy związane z drganiami, nagłym wzrostem prędkości przepływu lub przemianami fazowymi. Wynikiem jest lokalna utrata zdolności cieczy do przenoszenia naprężeń rozciągających. Najczęściej następuje ona na innych rozproszonych w niej ośrodkach (zanieczyszczeniach) zwanych zarodkami kawitacji. Utrata ciągłości cieczy powoduje, że nad zanieczyszczeniem pojawia się lokalna „próżnia”, a zwilżająca zanieczyszczenia ciecz gwałtownie paruje tworząc pęcherzyk kawitacyjny. Na pęcherzyk ten oddziałują ciśnienie cieczy, w której on powstaje. Układ sił pochodzących od ciśnienia zewnętrznego i wewnętrznego działających na ściankę pęcherzyka nie jest równowadze i rosnący początkowo pęcherzyk szybko ulega implozji, której towarzyszy powstanie lokalnej fali

uderzeniowej. Jej prędkość może być wystarczająca do wywołania zużycia erozyjnego powierzchni elementów silnika. Warunkiem jest jednak powstanie pęcherzyka na powierzchni elementu. Należy tu podkreślić, że kawitacja ma charakter dynamiczny, a większość obserwowanych przypadków kawitacji ma charakter wielotypowy, stąd ściśle określenie form i rodzajów kawitacji występujących w silniku jest dość kłopotliwe i zostaje w artykule pominięte [1].

Podstawowym objawem działania kawitacji na elementy silnika jest postępujący ubytek materiału, który po degradacji struktury pierwotnej jest rozpraszany w cieczy w formie drobnych ziaren. Stąd kawitacja jest źródłem zanieczyszczeń cieczy, w której występuje. Jak wspomniano silniki spalinowe podczas pracy mogą wykorzystywać trzy układy hydrauliczne. Większość silników korzysta z układu

chłodzenia opartego na ciekłym medium roboczym. Specyficzna konstrukcja ka-dłuba i innych podzespołów silnika jak również zjawiska dynamiczne związane z pracą silnika powodują, że układy chłodzenia stają się też miejscem występowania zjawiska kawitacji i związanej z nią erozji. Elementami uszkodzonymi w wyniku kawitacji związanej z układem chłodzenia są: termostaty, wirniki pomp wodnych, kanały płynu chłodzącego oraz tuleje cylindrowe. Uszkodzenia kawitacyjne tulei związane są najczęściej z ich drganiami wywoływanymi oddziaływaniem tłoka na tuleję. Tuleja cylindrowa po uderzeniu tłokiem drga z częstotliwością 900÷2000 Hz. W zależności od częstotliwości i amplitudy tych drgań przyspieszenia poszczególnych punktów tulei przekraczają kilkudziesięciokrotnie przyspieszenie ziemskie. Efektem jest odrywanie się strugi cieczy chłodzącej od



Rys. 1. Uszkodzone przez erozję kawitacyjną mokre tuleje cylindrowe silnika 359M [2]

zewnątrznej powierzchni tulei. Kawitacja pojawia się także w układach smarowania. Zjawisko erozji kawitacyjnej obserwowane głównie w łożyskach ślizgowych o znacznych wydatkach oleju jest jednym z trudniejszych problemów konstrukcyjnych i eksploatacyjnych w nowoczesnych silnikach spalinowych [2, 4].

Zużycie kawitacyjne występuje również w zespołach precyzyjnych układu wtryskowego silników ZS. Występuje ono głównie w miejscach zwężeń przekrojów przepływowych, gdzie paliwo osiąga większe prędkości oraz tam, gdzie występują wiry spowodowane nieciągłością przekroju np. w elemencie tłoczącym. Jednak w klasycznych układach wtryskowych udział kawitacji w globalnym zużyciu ich elementów był słabo dostrzegalny. Wynikało to z faktu, że więk-

szość uszkodzeń elementów układów wtryskowych powodowana była tarciami i obecnością twardych zanieczyszczeń w paliwie. Obecnie jednak uszkodzenia kawitacyjne są łatwo dostrzegalne zwłaszcza w wtryskiwaczach układów wysokociśnieniowych.

## 2. Zaobserwowane przykłady uszkodzeń kawitacyjnych

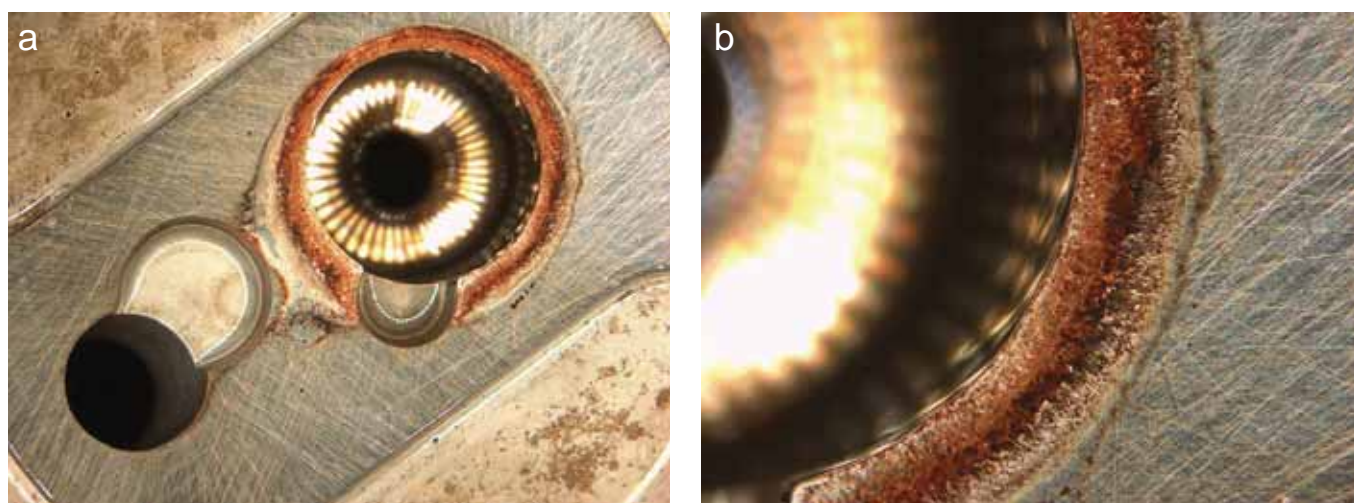
### 2.1. Tuleje cylindrowe

Na rysunku 1 przedstawiono mokre tuleje cylindrowe pochodzące z silników wysokoprężnych typu 359M z widocznymi śladami uszkodzeń spowodowanych działaniem kawitacji. Uszkodzenia pojawiły się po przejechaniu ok. 150 tys. km. Objawem uszkodzenia było przedostawanie się spalin do układu chłodzącego, w efekcie czego nastąpił wypływ płynu

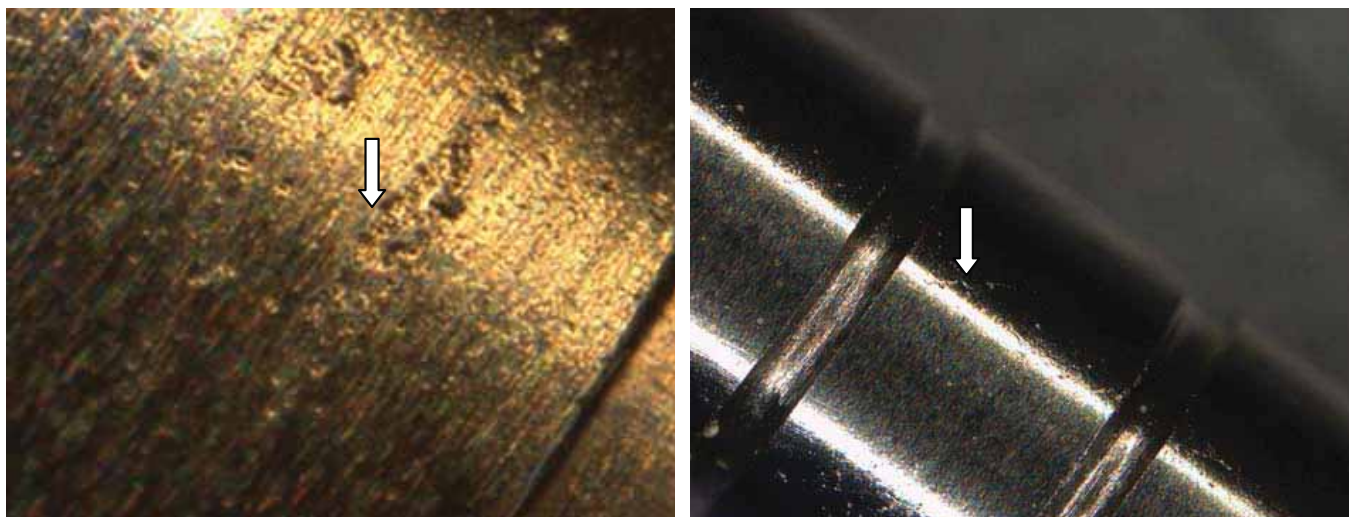
zaworem przelewowym umieszczonym w korku zbiornika wyrównawczego. Wewnętrzna strona tulei nie posiadała widocznych uszkodzeń. Ubytek płynu chłodzącego następował dopiero po nagraniu silnika- podczas jazdy z obciążeniem. Jak później stwierdzono efekty kawitacji były najsilniejsze w okolicy gdzie grubość płaszczki wodnego przepływającej cieczy była najmniejsza. Pomimo, że silniki te nie są już produkowane to pokazany przykład ma charakter modelowy.

### 2.2. Wtryskiwacze układów common rail

Uszkodzenia kawitacyjne w klasycznych układach wtryskowych pomimo, że czasami były obserwowalne, to jednak nie występowały tak często jak we wtryskiwaczach wysokociśnieniowych układów zasobnikowych. We wtryskiwaczach



Rys. 2. Uszkodzenia kawitacyjne zaworka zwrotnego wtryskiwacza elektromagnetycznego układu common rail: a) widok całego otworka-powierzchnia o zabarwieniu rdzy jest to wżer kawitacyjny, b) powiększony fragment uszkodzonej powierzchni.



Rys. 3. Wżery kawitacyjne na powierzchni iglicy wtryskiwacza piezoelektrycznego firmy Bosch

tych kawitacja jest szczególnie widoczna w miejscach przerywania przepływu cieczy- paliwa tzn. w zaworkach zwrotnych. Wysokie ciśnienia, małe szczeliny i duża prędkość przepływu w wyjątkowy sposób sprzyjają kawitacji. Ważne jest też, że wtryskiwacze te pracują kilka razy na jeden cykl pracy silnika (dzielone dawki paliwa) - co istotnie zwiększę intensywność kawitacji. Na rysunku 2 przedstawiono widok kawitacji przyłgni zaworka zwrotnego wtryskiwacza elektromagnetycznego firmy Bosch.

Uszkodzenia kawitacyjne we wtryskiwaczach układów common rail nie dotyczą tylko zaworów zwrotnych pojawiają się też na powierzchni iglic zaworów piezoelektrycznych, nawet tych pozbawionych sprężyn, o zredukowanej masie elementów ruchomych (bardzo szybkich pozwalających na dzielenie wtryskiwanej dawki paliwa nawet na 7 części). W tym przypadku kawitacja jest dodatkowym źródłem zanieczyszczeń mechanicznych, które przepływają wraz z paliwem do otworków wtryskowych. Zatem jest ona inicjatorem uszkodzeń ciernych przylegających do siebie powierzchni iglicy i końcówki wtryskiwacza. Obraz wżerów kawitacyjnych na iglicy wtryskiwacza

piezoelektrycznego przedstawiono na rysunku 3.

#### Podsumowanie

- ◆ Uszkodzenia kawitacyjne w silnikach występują we wszystkich podzespołach hydraulicznych silnika: układzie smarowania, układzie chłodzenia oraz układzie zasilania paliwem.
- ◆ W klasycznych układach wtryskowych dominującym mechanizmem powstawania uszkodzeń były procesy tribologiczne związane z tarciem. Uszkodzenia powstawały najczęściej na skutek oddziaływania zanieczyszczeń mechanicznych na powierzchni par precyzyjnych. Pomimo, że w układach tych obserwowano czasami efekty pojawiania się kawitacji to jednak nie był to proces dominujący przy powstawaniu uszkodzeń eksploatacyjnych.
- ◆ We współczesnych wysokociśnieniowych układach wtryskowych kawitacja powoduje uszkodzenia elementów wtryskiwaczy, przy czym jest ona jedną z przyczyn powodujących konieczność wycofania wtryskiwacza z eksploatacji. Uszkodzenia kawitacyjne pojawiają się często na zaworkach

zwrotnych wtryskiwaczy. Uszkodzenia te dotyczą zarówno wtryskiwaczy sterowanych elektromagnetycznie jak i piezoelektrycznie.

- ◆ Erozji kawitacyjnej we wtryskiwaczach układów common rail sprzyjają: dzielenie dawki wtryskiwanego paliwa, niewielkie szczeliny w zaworkach zwrotnych lub innych elementach, duże przyśpieszenia jakim poddawane jest wtryskiwane paliwo oraz wysokie ciśnienie panujące w układzie - które sprzyja zjawiskom dynamicznym w paliwie.

#### Bibliografia

1. Bagieński J.: *Kawitacja w urządzeniach wodociągowych i ciepłowniczych*, Wydawnictwo Politechniki Poznańskiej, Poznań 1998.
2. Gardyński L., Ignaciuk P.: *Uszkodzenia kawitacyjne tulei cylindrowych w silniku 359M*. Journal of KONES 1997
3. Idzior M.: *Tendencje zmian konstrukcyjnych wtryskiwaczy silników o zapłonie samoczynnym*. Materiały konferencyjne MOTROL 2006
4. Woźniak D.: *Ocena techniczna silników po awarii*. Logistyka nr 10/2006.

#### **Cavitation damages in combustion engines**

*The paper presents internal combustion engine as a machine containing hydraulic components, in which cavitation phenomena occurs. The presence of cavitation in these Cavitation appearing in these systems is the cause of the damage. The influence of cavitation erosion on the development of tribological damages.*

**Keywords:** internal combustion engine, hydraulic system, cavitation, cavitation erosion.

#### **Autorzy:**

dr inż. **Piotr Ignaciuk** – Politechnika Lubelska w Lublinie

dr inż. **Leszek Gil** – Wyższa Szkoła Ekonomii i Innowacji w Lublinie